

宇都宮大学 正 ○奈良崎 道治 高周波熱錬(株) 正 生田 文昭
埼玉工業大学 正 巨 東英

1. まえがき

近年、数値解析技術とコンピュータの性能の著しい進歩に伴って、合金の焼入れ過程における相変化と熱・力学的挙動を解析するための熱処理解析コードが開発され、それらを用いた焼入れプロセスのシミュレーションについての報告が数多くなされている。これらの報告の多くは、鋼部品に関するものであり、鋼部品の高精度化と高品質化及び生産コスト低減を目指した生産技術開発の有効な手段として、焼入れシミュレーションが注目され、そのシミュレーション精度の向上が強く望まれている。

本研究では、鋼の焼入れ変形と残留応力の解析精度に影響を及ぼす因子の一つとして変態塑性に注目し、変態・熱・力学理論¹⁾に基づく焼入れ過程のシミュレーションの精度に対して変態塑性の考慮がどのような影響を及ぼすかについて検討を行った。

2. 解析方法

2.1 解析モデル

解析の対象としてφ20×60mmのS45C鋼円柱を選んだ。シミュレーションにおいては、上下対称の軸対称問題として円柱全体の1/4について2次元解析を行った。要素数は300である。

2.2 解析コード及び解析条件

解析には、熱処理解析コードHEARTSを用い、加熱及び焼入れ過程における温度、相変態及び応力／ひずみの連成解析を行った。解析においては、まず加熱過程について計算し、次に水焼入れ及びポリマー焼入れの2通りの焼入れ過程について計算した。この際、後述する表面熱伝達率を焼入れ過程の表面境界条件として、相変態による潜熱及び応力による仕事(発熱)を考慮した非定常・非線形熱伝導解析及び相変態解析と応力－ひずみ解析との連成解析を行った。なお、相変態と応力／ひずみの連成においては変態応力／ひずみを考慮する場合と考慮しない場合について解析を行い、比較検討した。

2.3 表面境界条件(冷却時)

焼入れシミュレーションの精度は、焼入れ時の表面熱伝達率の精度に強く依存することを確認した²⁾。そこで、解析に用いる焼入れ冷却時の表面境界条件としては、以下の方法で同定した熱伝達率を使用した。

まず、JIS K2242に規定された銀棒プローブを水焼入れ及びポリマー焼入れした際の冷却曲線から、集中熱容量法³⁾を用いて熱伝達率を算出する。次に、これらの熱伝達率を初期表面境界条件として、S45C鋼円柱の冷却プロセスの解析をHEARTSによって行い、冷却曲線の計算値と実測値とを比較する。さらに、

これらの冷却曲線が近づくように表面境界条件である熱伝達率を修正して再度計算する。このような作業を冷却曲線の実測値と計算値ができるだけ一致するまで試行錯誤によって繰り返して熱伝達率を同定した。

3. シミュレーション結果

3.1 焼入れ後のマルテンサイト分布と変形形状

鋼円柱の焼入れ後のマルテンサイト分布と変形形状の解析結果をFig. 1に示す。いずれの場合も円柱側表面と端面の近傍はほぼ完全なマルテンサイトとなっており、水焼入れの場合の方が焼入れ深さが深い。なお、変態塑性を考慮するかしないかによってマルテンサイト分布はさほど変わらないが、変形形状は異なっている。

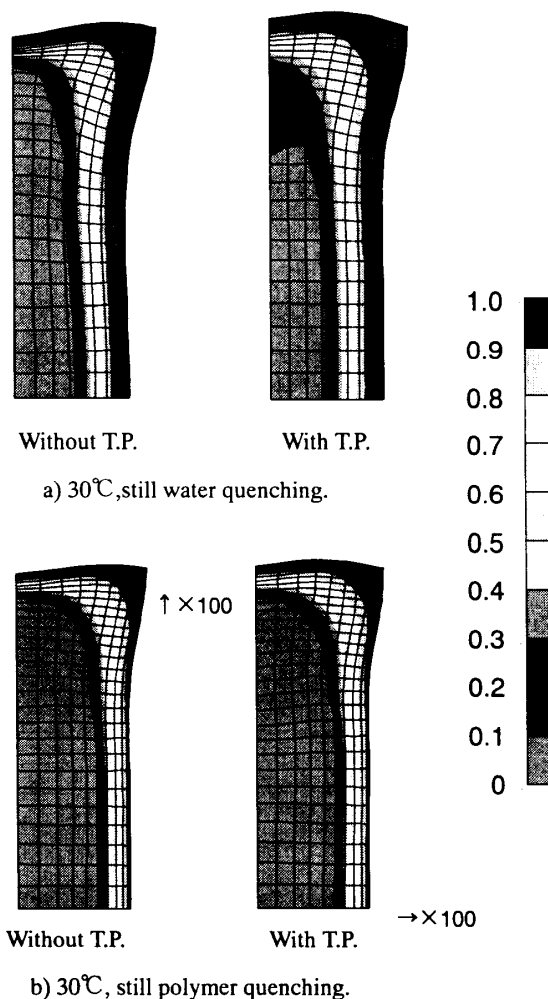


Fig.1 Simulated volume fraction of martensite and shape ($\times 100$) of S45C steel cylinder ($\phi 20 \times 60\text{mm}$) after quenching. T.P.: transformation plasticity.

Fig. 2 及び Fig. 3 に、焼入れ後の軸方向変位と半径方向変位の計算値と実測値を比較して示した。実測値は複数の試片についてそれぞれ異なるプロットで示した。解析結果は、変態塑性を考慮した結果を実線で、考慮しない場合の結果を破線で示した。焼入れ後の変形形状はいずれの場合も両端面が太くなる鼓型形状を示し、円柱の太さと長さが増加していることがわかる。ただし、変形の程度は、ポリマー焼入れの方が水焼入れの場合よりもかなり小さく、いずれの場合も変形の傾向は実測値とほぼ一致している。なお、変形に及ぼす変態塑性考慮の影響はさほど顕著ではないものの、半径方向の変形は変態塑性を考慮した場合の方が小さくなり、軸方向の変形は変態塑性を考慮した場合の方が大きくなっており、全体として変態塑性を考慮することによって計算値が実測値に近づいている。

3.2 残留応力

焼入れ後の残留応力の実測値と計算値を Fig. 4 及び Fig. 5 に示す。軸方向及び円周方向のいずれの場合も、残留応力の分布形状は実測値と計算値とが類似しているものの、定量的には変態塑性を考慮した場合の方が実測値に近づいている。特にポリマー焼入れの場合は変態塑性の考慮によって実測値に近い値が得られている。水焼入れの場合に計算値と実測値の差が比較的大きいが、この原因については今後の検討が必要である。

4. まとめ

鋼円柱試片の焼入れ変形と残留応力のシミュレーション結果は、変態塑性の考慮によって実測値に

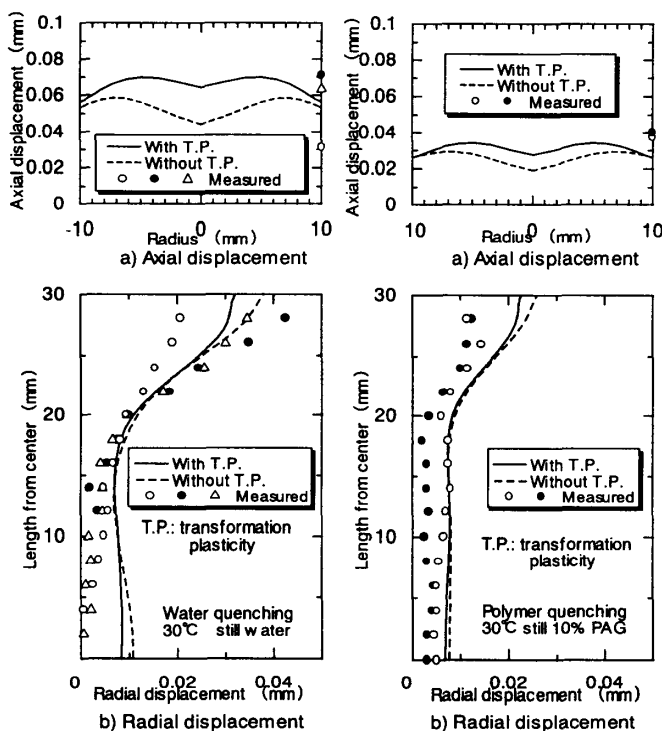


Fig.2 Axial and radial displacements after water quenching.

Fig.3 Axial and radial displacements after polymer quenching.

近づくことが確認され、焼入れシミュレーションにおける変態塑性の重要性が確かめられた。

参考文献

- 1) T. Inoue and K. Tanaka, Int. J. Mech. Sci., 17, 361 (1975).
- 2) M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori and S. Fuchizawa, Proceedings of the 18th ASM Heat Treating Society Conference, (1998).
- 3) M. Narazaki, M. Kogawara, A. Shirayori and S. Fuchizawa, Proceedings of the 6th International Seminar of IFHT, Kyongju, Korea, 428 (1997).

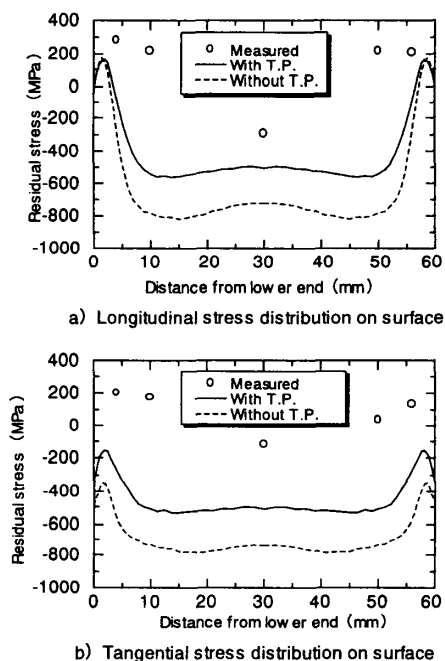


Fig.4 Longitudinal and tangential stress distribution on surface of S45C steel cylinder after water quenching.

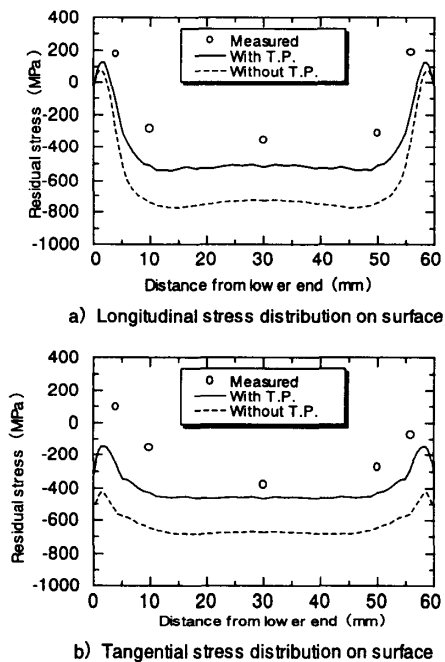


Fig.5 Longitudinal and tangential stress distribution on surface of S45C steel cylinder after polymer quenching.